

УДК 620.172.2:669-179

В. А. Москвина^{1*}, Е. А. Загibalова², К. Н. Рамазанов³¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск³ Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

*valya_moskvina@mail.ru

Научный руководитель — доц., д-р физ.-мат. наук Е. Г. Астафурова

ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ЗЕРНА

В работе исследованы механические свойства при растяжении и нанотвердость мелкозернистых (3–6 мкм) и крупнозернистых (55 мкм) образцов аустенитной нержавеющей стали, подвергнутой ионно-плазменной обработке в смеси $N_2 + C_2H_2 + Ar$ при температуре 540 °С в течение 12 ч.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь, ионно-плазменная обработка, размер зерна, механические свойства, наноиндентирование

V. A. Moskvina, E. A. Zagibalova, K. N. Ramazanov

THE INFLUENCE OF ION-PLASMA TREATMENT ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL WITH DIFFERENT GRAIN SIZES

In given work, the tensile properties and nanohardness of fine-grained (3–6 μm) and coarse-grained (55 μm) austenitic stainless steel specimens subjected to ion-plasma treatment in a mixture of gases $N_2 + C_2H_2 + Ar$ at a temperature of 540 °C for 12 hours were experimentally investigated.

Key words: austenitic stainless steel, ion-plasma treatment, grain size, mechanical properties, nanoindentation

Широкое распространение в промышленности аустенитных нержавеющей сталей (АНС) на Fe–Cr–Ni основе обусловле-

но хорошей формуемостью, коррозионной стойкостью, немагнитностью и высокой пластичностью. Устранение основного недостатка АНС, низкого предела текучести, возможно с применением деформационного упрочнения, твердорастворного упрочнения и дисперсионного твердения. Альтернативой традиционным способам улучшения прочностных свойств АНС является ионно-плазменное поверхностное насыщение атомами внедрения (N, C, N+C) — азотирование, цементация и нитроцементация. Ионно-плазменная обработка (ИПО) в смеси газов, содержащих азот и/или углерод, способствует изменению структуры и фазового состава поверхностного слоя в обрабатываемых сплавах, что в свою очередь приводит к повышению поверхностной твердости и износостойкости сплавов. В литературе, посвященной азотированию и цементации АНС, практически отсутствуют данные по влиянию размера зерна в стали на структурно-фазовые и механические характеристики поверхностных слоев, формируемых в процессе ИПО. Целью данной работы являлось установление влияния ИПО на механические свойства при растяжении и нанотвердость образцов АНС 01X17 H13 M3 с разным размером зерна.

Объектом исследования была выбрана АНС 01X17 H13 M3 (Fe—16,8Cr—13,3Ni—2,7Mo—1,7Mn—0,6Si—0,01C мас. %), стабильная к фазовым превращениям в процессе пластического деформирования. Три партии заготовок АНС обрабатывали по следующим схемам: партия МС1 — прокатка при комнатной температуре (T_k) до степени обжатия $\varepsilon = 80\%$ и отжиг при $900\text{ }^\circ\text{C}$ (2 мин); партия МС2 — прокатка до $\varepsilon = 80\%$ при T_k и отжиг при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (7 мин); партия КС3 — прокатка до $\varepsilon = 40\%$ при T_k и отжиг при $1050\text{ }^\circ\text{C}$ (5 ч). Из каждой партии заготовок вырезали образцы в форме двойных лопаток с размерами рабочей части $1,7 \times 2,7 \times 18$ мм. ИПО образцов осуществляли в смеси газов Ar (70 %) + N₂ (25 %) + C₂H₂ (5 %), при давлении 300 Па и температуре $540\text{ }^\circ\text{C}$ (12 ч). Образцы до и после ИПО подвергали одноосному растяжению до разрыва при комнатной температуре с начальной скоростью деформации $4,6 \times 10^{-4}\text{ с}^{-1}$ (Instron 3369). Для определения размера зерна использовали карты зеренной структуры (без учета двойниковых границ), полученные методом дифракции обратнорассеянных электронов (Quanta 200 3D). Наноиндентирование образцов осуществляли на поперечных шлифах от упрочненной поверхности к центру образцов с использованием индентора Виккерса при нагрузке 3 мН (CSEM Nano Hardness Tester).

После термомеханических обработок в стали была сформирована аустенитная структура с разным размером зерна. Прокатка и пост-деформационные отжиги (МС1 и МС2) способствовали формированию мелкозернистой структуры со средним размером зерна $d = 3,7 \pm 2,4$ мкм и $d = 5,9 \pm 3,9$ мкм, соответственно. В образцах партии КС3 была сформирована крупнозернистая структура с размером зерна $d = 54,7 \pm 31,2$ мкм. Результаты одноосного растяжения образцов свидетельствуют о том, что с увеличением размера зерна происходит уменьшение прочностных характеристик и увеличение пластичности стали. В образцах с мелкозернистыми структурами предел текучести ($\sigma_{0,2}$) составляет 560 МПа и 430 МПа, относительное удлинение до разрушения (δ) 38 % и 42 % (МС1 и МС2 соответственно). Предел текучести крупнозернистых образцов ниже (300 МПа), при этом δ достигает 50 %. Кривые течения имеют одинаковую стадийность для всех образцов. Анализ результатов наноиндентирования выявил аналогичную зависимость нанотвердости от размера зерна: с увеличением размера зерна в образцах значение нанотвердости уменьшалось. Для МС1-и МС2-образцов нанотвердость составляет $HV = 3,2$ ГПа и $HV = 2,9$ ГПа, а для КС3-образцов $HV = 2,7$ ГПа.

Независимо от размера зерна в стали в результате ИПО на поверхности образцов образуется гетерофазный композиционный слой толщиной $\approx 12\text{--}15$ мкм (МС1 и МС2) и ≈ 25 мкм (КС3). Ионно-плазменная обработка слабо влияет на изменение предела текучести и прочности МС1 и МС2 образцов и приводит к потере пластических свойств на 18–20 %. ИПО крупнозернистых образцов вызывает меньшие эффекты охрупчивания по сравнению с МС1 и МС2 состояниями, и потеря пластичности составляет 8 %. На ранних степенях деформации (до 10 %) коэффициенты упрочнения для всех ИПО-образцов выше, чем в исходных состояниях. После ИПО скорость деформационного упрочнения выше в мелкозернистых образцах.

Анализ профилей распределения нанотвердости по глубине образцов после ИПО позволил выявить три характерные области: композиционный слой, диффузионную зону и матрицу. Профили нанотвердости имеют сложную стадийность и изменяются нелинейно по направлению от обработанной поверхности вглубь образцов. По мере продвижения от поверхности к матрице значения нанотвердости постепенно снижаются и достигают значений, соответствующих исходным состояниям. КС3-образцы обладали наибольшими значе-

ниями нанотвердости в композиционном слое $HV=17$ ГПа, по сравнению с образцами МС1 и МС2, для которых максимальная нанотвердость в слое достигла 12 ГПа и 10 ГПа. С увеличением размера зерна толщина композиционного слоя и диффузионной зоны увеличиваются. Для образцов с мелкозернистыми структурами характерен существенный разброс значений нанотвердости в композиционных слоях, для крупнозернистых образцов такого разброса не наблюдали. Это может быть связано с увеличением объемной доли границ зерен, которые являются наиболее благоприятными местами для зарождения нитридных и карбонитридных фаз при ИПО стали. Ширина диффузионной зоны в крупнозернистых образцах составляет ≈ 50 мкм и уменьшается до $\approx 30\text{--}35$ мкм в мелкозернистых.

Таким образом, поверхностная ионно-плазменная обработка приводит к формированию гетерофазного композиционного слоя в образцах стали независимо от размера зерна. ИПО приводит к уменьшению пластичности стали и вызывает сильное деформационное упрочнение в мелкозернистых образцах. Различие в объемной доле границ зерен образцов оказывает существенное влияние на толщину упрочненного слоя и диффузионной зоны. С увеличением размера зерна в образцах толщина упрочненного слоя увеличилась в ≈ 2 раза. После ИПО образцы в крупнозернистом состоянии характеризуются наибольшими значениями нанотвердости в упрочненном слое (до 17 ГПа) по сравнению с образцами с мелким зерном, в которых максимальные значения нанотвердости достигают 12 ГПа и 10 ГПа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
стипендии Президента РФ (СП-14.2019.1).*